

## МЕТОДЫ СПЕКТРОСКОПИИ ЯГР, ЭПР И ИК-ПОГЛОЩЕНИЯ В МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТИТАНОВЫХ РУД

Лютюев В.П.<sup>1</sup>, Макеев А.Б.<sup>2</sup>, Лысюк А.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИГ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, [vlutoev@geo.komisc.ru](mailto:vlutoev@geo.komisc.ru),

<sup>2</sup>ИГЕМ РАН, г. Москва, [abmakeev@igem.ru](mailto:abmakeev@igem.ru)

Россия является самым крупным в мире производителем металлического титана и его сплавов. При этом в стране не разрабатывается ни одно собственное месторождение этого металла, хотя по разведанным запасам титана страна занимает второе место в мире после Китая с его огромным эксплуатируемым коренным месторождением Паньчжихуа. Ильменитовый концентрат как основное сырье для получения металлического титана импортируется из Украины. Производство пигментного диоксида титана, основного продукта мировой титановой индустрии, в стране практически полностью отсутствует, что компенсируется поставками из США, Китая и Украины.

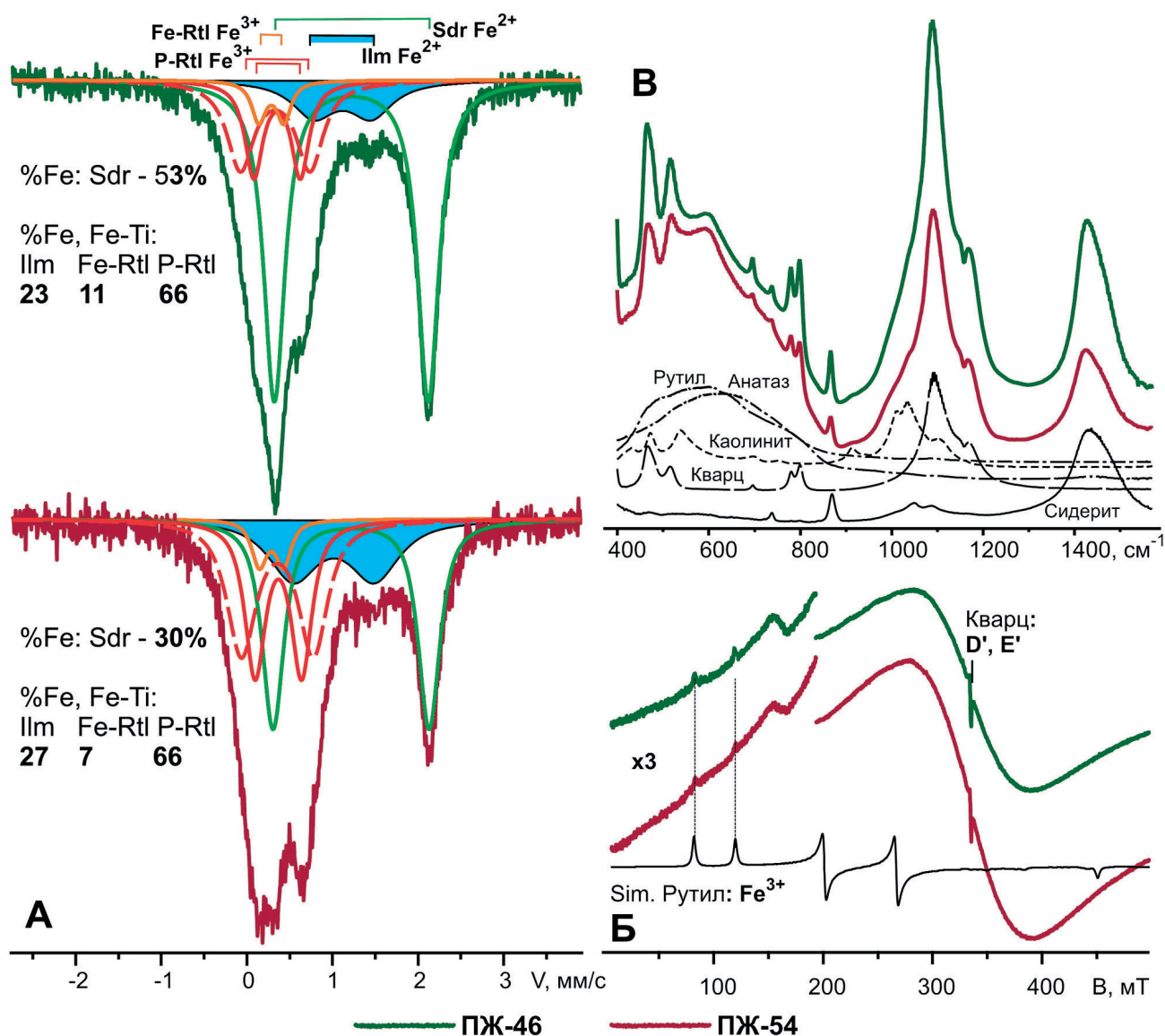
В стране в различной степени оценено и разведано более 30 коренных и россыпных месторождений титана [Быховский и др., 2007]. Разведанные запасы примерно поровну распределяются в коренных и россыпных месторождениях. Титаномагнетитовые и апатит-ильменитовые магматогенные месторождения расположены на Алданском и Балтийском щитах, а также в пределах габброидного пояса западного склона Южного Урала. Обогащенность титаном этих руд (2–15 %  $\text{TiO}_2$ ) значительно ниже, чем в зарубежных разрабатываемых месторождениях этого типа в Канаде и Норвегии, но сравнимо с китайским месторождением Паньчжихуа (9 %  $\text{TiO}_2$ ). Более 80% разведанных запасов диоксида титана россыпных месторождений России сосредоточено в Ярегском нефтетитановом палеороссыпном месторождении Южного Тимана. По геологическому строению и минералогическим особенностям к нему близки титаносные песчаники Пижемского месторождения на Среднем Тимане [Макеев и др., 2012]. Данные палеороссыпи обладают огромными запасами, но их руды труднообогатимы, технология обогащения пока окончательно не отработана.

Несмотря на длительную историю изучения россыпных и коренных объектов титанового сырья в стране, признается низкая степень его минералогической и технологической изученности. В значительной степени это объясняется переменными химическим и фазовым составами руд, сложным взаимоотношением рудообразующих минералов в результате

распада твёрдых растворов и их последующих преобразований, низкой степенью упорядочения рудных минералов. Стандартные химический, минераграфический рентгенофазовый анализы не позволяют в полной мере получить надёжные сведения об их количественном минеральном составе, что крайне необходимо для разработки эффективной технологии их переработки [Пирогов и др., 2013].

Необходимые минералогические и технологические характеристики таких руд могут быть получены с применением микрондвойной техники в комплексе со структурно чувствительными методами анализа горных пород, такими как ИК-спектроскопия, используемая для фазового анализа даже рентгеноаморфных веществ, мёссбауэровская спектроскопия  $^{57}\text{Fe}$  (ЯГР) и электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), позволяющие напрямую проводить количественный фазовый анализ железосодержащих минералов с получением объективных сведений об их соотношениях в рудах. Результативность названных методов спектроскопии для изучения титановых руд нами была показана на примере некоторых россыпных и коренных объектов на территории России и китайского месторождения Паньчжихуа.

Исследована технологическая схема получения концентратов титановых минералов из пижемских титаносных песчаников, включающая: дробление, оттирку, обесшламливание, гравитационное обогащение, классификацию и магнитную сепарацию [Макеев, Лютюев, 2015]. В отличие от Ярегского месторождения, значительная часть рудного компонента титаносных песчаников Пижемского месторождения представлена реликтовым ильменитом. Показано, что в немагнитной фракции в классе 0.50–0.125 мм концентрируется почти весь лейкоксен, а в классе 0.125–0.040 мм накапливаются лейкоксен, рутил и циркон. В магнитную фракцию обоих продуктивных классов попадают ильменит, Fe-рутил, псевдорутил и сидерит. Достоверно установлен минеральный состав железо-титановых фаз в технологических концентратах пижемских руд (рис. 1). Рассчитано соотношение лейкоксена и магнитных титановых минералов (~ 5:3) в коллективном концентрате, а также соотношение псевдорутила, ильменита и Fe-рутила



**Фазовый минеральный состав концентратов по результатам мессбауэровского распределения железа и нормативного пересчета химических анализов**

Пробы	Массовая доля минералов*, %											
	Qtz	Lcs	P-Rtl	Ilm	Fe-Rtl	Rtl	Sdr	Mnz	Zrc	Mic	Prt	Сумма
ПЖ-40	6,00	48,59	21,59	4,13	5,47	1,30	5,00	0,42	0,15	6,52	0,17	99,99
ПЖ-41	5,00	50,12	19,72	4,65	7,19	1,50	3,50	0,37	0,12	6,86	0,19	99,94
ПЖ-44	14,00	0	46,21	9,73	5,54	0	10,53	0,45	0,09	4,91	0,09	99,86
ПЖ-46	16,00	0	43,74	7,60	7,55	0	13,95	0,42	0,09	4,41	0,07	99,84
ПЖ-52	0	0	74,63	9,71	3,53	0	5,26	0,68	0,25	5,17	0,04	99,93
ПЖ-54	0	0	67,35	19,95	5,64	0	9,48	0,63	0,21	5,00	0,04	99,99

\* Qtz — кварц, Lcs — лейкоксент, P-Rtl — псевдорутил, Ilm — ильменит, Fe-Rtl — ферритил, Rtl — рутил, Sdr — сидерит, Mnz — монацит, Zrc — циркон, Mic — серицит, Prt — пирит.

Рис. 1. Примеры интерпретации спектров ЯГР (А), ЭПР (Б) и ИК-поглощения (В) концентратов пажемских титановых руд и их минеральный состав с учетом данных спектроскопии

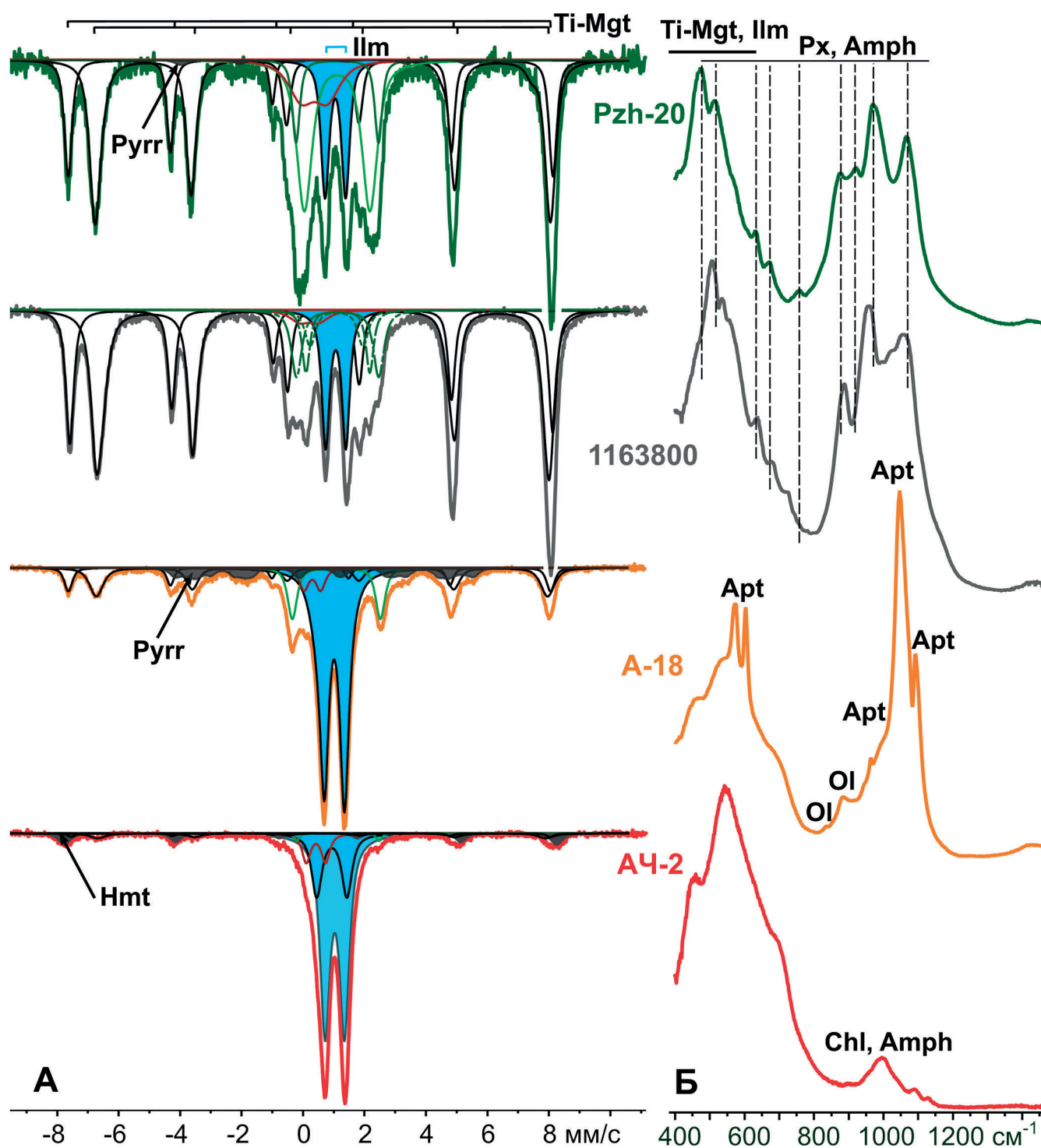


Рис. 2. Примеры интерпретации спектров ЯГР (А) и ИК-поглощения (Б) титаномагнетитовых руд месторождений Паньчжихуа (Phz-20), Чинейского (1163800), Кручининского (А-18) и Ачинского (АЧ-2)

(~ 20:4:6). В мелкой магнитной фракции это соотношение изменяется в сторону увеличения в черновом концентрате содержания ильменита и уменьшения содержания Fe-рутила. Рекомендовано применение операций доводки концентратов для их очистки от сростков с кварцем и сидерита.

Методом мёсбауэровской и ИК-спектроскопии получены количественные данные о соотношении железосодержащих минеральных фаз в рудах ти-

таномангнетит-ильменитовых месторождений в габброидных массивах Восточной Сибири (Чинейского, Слюдинского, Быстринского и Кручининского), Кольского полуострова (Цагинского, Ачинского в Кевском рудном районе) в сравнении с аналогичными рудами китайского массива Паньчжихуа [Лютюев и др. 2017а; 2017б]. Так как ильменит является основным промышленным титановым минералом в коренных месторождениях подобного магматического генезиса

(извлечение и переработка которого осуществляется в стандартных технологических процессах), то определение его соотношений с титаномагнетитом, магнетитом и безрудной массой силикатных минералов является основной минералого-технологической задачей.

Определено количественное соотношение железосодержащих минералов оксидов и силикатов, соотношение ильменита и титаномагнетита. Выделено три минералого-технологических типа титановых руд. Установлено отсутствие заметных количеств ильменита в рудах Быстринского месторождения, где рудный минерал представлен только титаномагнетитом. Низкое содержание ильменита в рудном компоненте на уровне около 30 мас. % и ниже (микрозернистая текстура, тонкое прораствание рудных Ti–Fe-минералов) в Чинейском и Цагинском месторождениях требует применения современных технологий, которые успешно применяются на зарубежных месторождениях массивов Паньчжихуа (Китай) и Бушвельд (ЮАР). Руды восточносибирских Кручининского и Слюдинского месторождений, Ачинского месторождения на Кольском полуострове с содержанием более 50 мас. % ильменита соответствуют требованиям промышленности и пригодны для переработки в стандартном технологическом процессе. При этом повышенные содержания магнитного пирротина (~10 мас. %) в рудах Кручининского месторождения не снижают качества титановых руд, требуя только применения дополнительных операций – магнитной сепарации и флотации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Быховский Л. З., Калиш Е. А., Пахомов Ф. Л., Тигунов Л. П. Актуальные проблемы повышения инвестиционной привлекательности месторождений титана в России // Разведка и охрана недр. 2007. № 11. С. 14–18.
4. Лютоев В. П., Гонгальский Б. И., Макеев А. Б., Лысюк А. Ю., Магазина Л. О., Таскаев В. И. Титаномагнетитовые руды: минеральный состав и мёссбауэровская спектроскопия // Минералогия. 2017а. № 2. С. 43–65.
3. Лютоев В. П., Макеев А. Б., Лысюк А. Ю. Минеральный состав титаномагнетитовых руд по данным инфракрасной и мёссбауэровской спектроскопии // Обогащение руд. 2017б. № 5. С. 28–36.
4. Макеев А. Б., Дудар В. А., Самарова Г. С., Быховский Л. З., Тигунов Л. П. Пижемское титановое месторождение (Средний Тиман): аспекты геологического строения и освоения // Рудник будущего. 2012. № 6. С. 16–24.
5. Макеев А. Б., Лютоев В. П. Спектроскопия в технологической минералогии, минеральный состав концентратов титановых руд Пижемского месторождения (Средний Тиман) // Обогащение руд. 2015. № 5. С. 33–41.
6. Пирогов Б. И., Броницкая Е. С., Астахова Ю. М., Волков Е. С. Особенности вещественного состава титаномагнетитовых руд магматического генезиса, определяющие их обогатимость. // Разведка и охрана недр. 2013. №2. С. 47-51.